

## 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价\*

张敏<sup>1,2</sup>, 邵美玲<sup>1</sup>, 蔡庆华<sup>1\*\*</sup>, 徐耀阳<sup>1,2</sup>, 王岚<sup>1,2</sup>, 孔令惠<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 2007年7月至2008年5月,按季度对丹江口水库4个区域(丹江库区、汉江库区、取水口、五青入库区)14个采样点进行大型底栖动物调查。共采集到底栖动物61种,主要由寡毛类(颤蚓科、仙女虫科)和摇蚊科组成。其中,寡毛类密度在全年中占优势地位,占底栖动物总密度的90%以上;生物量的优势种则主要为软体动物。空间分布上,底栖动物密度以汉江库区最高(大坝前:33792 ind./m<sup>2</sup>),丹江库区次之,取水口和五青入库区的密度相对较低,且五青入库区偶尔出现0密度的样品;生物量则由于丹江库区和取水口经常有软体动物出现而导致该区域内生物量相对较高。季节变化上,密度分布为夏季>春季>秋季>冬季;生物量也呈现出类似的分布,但秋季和冬季差别较小。采用Shannon-Wiener多样性指数、Goodnight-Whitley生物指数、Wright生物指数及Carlander生物量法对丹江口水库水质进行评价,比较而言,Goodnight-Whitley指数不适宜用于丹江口水库的水质评价;而综合利用其它三种方法进行评价的结果表明:取水口为轻污染状态,丹江库区为轻-中污染,汉江库区为中-重污染;五青入库区由于水深太浅,底栖动物生境易受外界影响导致群落波动较大,因此不宜采用底栖动物作为评价指标。

**关键词:** 底栖动物;时空分布;水质评价;丹江口水库

## Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir

ZHANG Min<sup>1,2</sup>, SHAO Meiling<sup>1</sup>, CAI Qinghua<sup>1</sup>, XU Yaoyang<sup>1,2</sup>, WANG Lan<sup>1,2</sup> & KONG Linghui<sup>1,2</sup>

(1: State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

**Abstract:** Macroinvertebrate was seasonally sampled at 14 sites of four regions (Regions Danjiang, Hanjiang, Wuqing, and the water intake) of the Danjiangkou Reservoir from July 2007 to May 2008. In total, 61 taxa were collected, mainly including Oligochaeta (Tubificidae and Naididae) and Chironomidae. Oligochaeta was dominant in the density of the macroinvertebrate all through the year, with the relative abundance over 90%. The dominant species of the biomass was, however, the *Annelida*. In the spatial distribution, the highest density appeared in Hanjiang region (adjacent to the dam: 33792 ind./m<sup>2</sup>), and then in the Danjiang region. The densities in the water intake region and the Wuqing region were relatively low. For the biomass, it was relatively high in Danjiang and the water intake regions, for the appearance of some *Annelida* species. Seasonally, the density was highest in summer, and then higher in spring, autumn and winter. The trend of the biomass distribution was similar in seasons, with little difference between autumn and winter. Water quality was estimated by multiple methods of Shannon-Wiener diversity, Goodnight-Whitley index, Wright index and the Carlander's biomass. By comparing all the assessment results, we could conclude that, Goodnight-Whitley index was not appropriate for the assessment of the water in Danjiangkou Reservoir. The assessment results by combining other three methods showed that, the pollution extent was weak in water intake region, intermediate in Danjiang region, interstrong in Hanjiang region. For Wuqing region, it was not suitable to be estimated by macroinvertebrate, due to the shallow water

\* 国家“十一五”科技支撑课题项目(2006BAC10B02)资助。2009-11-05 收稿;2009-12-02 收修改稿。张敏,女,1986年生,博士研究生;E-mail: zhangmin01@ihb.ac.cn.

\*\* 通讯作者;E-mail: qhcai@ihb.ac.cn.

depth and various macroinvertebrate community structures sensitively impacted by the water conditions.

**Keywords:** Macroinvertebrate; spatio-temporal distribution; water quality assessment; Danjiangkou Reservoir

底栖动物作为水生态系统的重要组成部分,不仅可以作为鱼类等经济动物的天然饵料,还可以充当分解者的角色对上层水体沉积下来的碎屑等颗粒物进行分解转化<sup>[1-2]</sup>,对生态系统的物质循环和能量流动过程有重要作用.此外,底栖动物对环境变化较为敏感,但由于生存在水底,移动能力较差<sup>[3]</sup>,只能被动地耐受环境的变化,加之生活史相对较长,从而可以反映出水体长期的营养状态或污染程度.因此,近年来越来越多地被应用于生态系统的健康评价<sup>[4-5]</sup>.

丹江口水库于1968年建成,地跨鄂、豫、陕三省,总库容 $174.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,正常蓄水位157m,在防洪、发电、灌溉、航运、养殖等方面发挥着重要作用.库区成“V”字形,分为丹江和汉江两大库区;大坝位于丹江和汉江汇合后下游的丹江口市.作为南水北调中线工程的水源地,库区水生态系统的健康对于当地的环境规划与保护都具有重要意义.丹江口水库兴建以前,波鲁茨基等曾于建坝前的1959年对未来库区的水生生物资源进行调查<sup>[6]</sup>;1992-1993年,韩德举等<sup>[7-8]</sup>又结合丹江口水库渔业规划对其进行更深入的调查.然而,大部分的研究都主要集中在浮游生物方面,有关底栖动物的研究相对较少.在韩德举等所作的调查<sup>[7]</sup>中,曾从鱼类饵料资源的角度描述了丹江口水库底栖动物密度及生物量水平的现状,而对于底栖动物群落结构的研究却鲜有报道.本文于2007年7月-2008年5月按季节对丹江口水库大型底栖动物群落结构进行了为期一年的调查,旨在了解其在库区的分布格局及季节动态,并对水库的水质进行简单的生物学评价.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域与采样点设置

丹江口水库地处亚热带季风气候区,其汛期一般始于5月下旬,结束于10月上旬,洪水在7、8、9月份出现频率最高,最大致洪过程一般发生在9、10月份<sup>[9]</sup>,即高频高强的洪水一般发生在夏秋季节.南水北调中线工程取水口陶岔位于丹江库区的河南省南阳市境内,水质总体状况较好,且非汛期水质要优于汛期<sup>[10]</sup>.

依据丹江口水库的地形特征及现有的研究结果,将水库划分为4个区域进行采样点设置:丹江库区、汉江库区、取水口、五青入库区(图1).丹江库区设置4个采样点(XSX、TCR、TCM、BXD);汉江库区设置6个采样点(DB、CJY、WJA、LJ、DZY、DJSQ);陶岔取水口设置1个采样点(TC01);五青入库区设置3个采样点(XDP、SCG、CJD).其中,五青入库区为汉江库区的两条入库河流五龙池、青塘河与丹江口水库汇合处(五龙池入库点为SCG;青塘河入库点为XDP),流域内水土流失较为严重,是丹江口市水土保持工作的重点工作区域之一.该区与陶岔取水口分属汉江和丹江库区,但为了对其水质进行特殊监测,将其单独划分出来进行对比.

### 1.2 样品采集与处理

自2007年7月-2008年5月按季节进行采样:夏季(2007年7月)、秋季(2007年11月)、冬季(2008年1月)、春季(2008年5月),共计4次.采样使用 $1/16\text{m}^2$ 和 $1/40\text{m}^2$ 的改良Peterson采泥器.2007年7月使用 $1/16\text{m}^2$ 采泥器,每样点采集一次;其余季节大部分样点使用 $1/40\text{m}^2$ 采泥器,每个样点采集3个重复样品,后合为一个样品分析;部分底栖动物密度较低的样点使用 $1/16\text{m}^2$ 采泥器采集一个样品.样品采集后经 $200\mu\text{m}$ 纱网筛洗干净,在解剖盘中将底栖动物检出,置入50ml的塑料标本瓶中,用10%福尔马林保存.标本鉴定后计数,折算成每平方米的密度(ind./ $\text{m}^2$ ),并称量其湿重( $\text{g}/\text{m}^2$ ).采样方法参照中国生态系统研究网络(CERN)规范执行<sup>[11-12]</sup>.

### 1.3 数据处理

生物多样性采用Shannon-Wiener多样性指数表示;生物指数采用Goodnight-Whitley生物指数和Wright生物指数.

Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )<sup>[13]</sup>:

$$H' = - \sum P_i \log_2 P_i$$

式中,  $P_i$  表示第  $i$  种的相对丰度, 即  $N_i/N$ ,  $N_i$  为第  $i$  种的密度,  $N$  为总密度.

Goodnight-Whitley 生物指数  $I_{CW}^{[14]}$ :

$$I_{CW} = \frac{\text{寡毛类密度}}{\text{底栖动物总密度}} \times 100$$

Wright 生物指数<sup>[14]</sup>: 每平方米颤蚓科的数量.

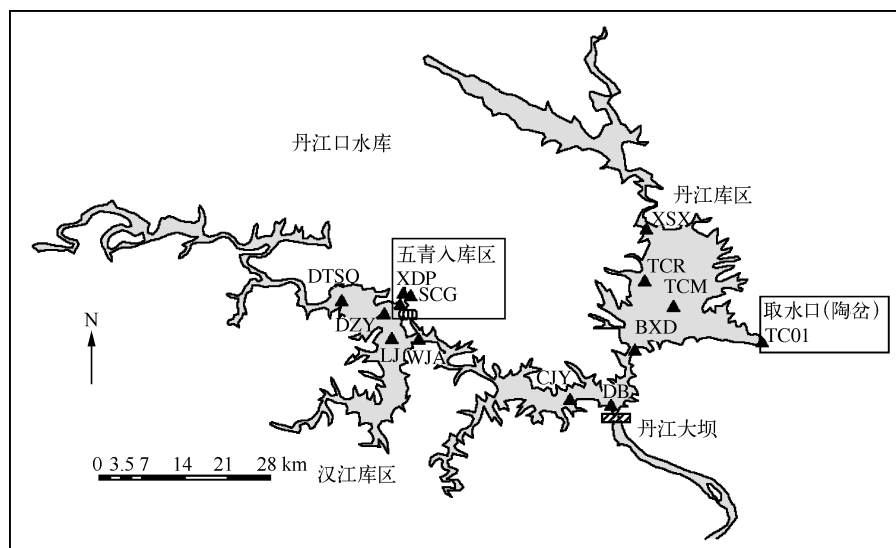


图1 丹江口水库样点分布

Fig. 1 Sampling sites in the Danjiangkou Reservoir

## 2 结果与分析

### 2.1 群落组成

4次采样共采集到底栖动物61种, 隶属5门6纲12科(表1). 其中环节动物24种, 占39.3%; 节肢动物28种, 占45.9%; 软体动物7种, 占11.5%; 线形动物1种; 扁形动物1种. 以环节动物门的寡毛类(颤蚓科、仙女虫科)和节肢动物门的摇蚊科为密度优势种; 而生物量优势种则为软体动物.

56个样品中, 以霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)出现频率最高(50次); 苏氏尾腮蚓(*Branchiura sowerbyi*)和正颤蚓(*Tubifex tubifex*)出现频率也均超过50%, 分别出现38次和32次.

### 2.2 底栖动物空间分布

总体而言, 汉江库区底栖动物密度最高, 丹江库区次之(图2). 生物量则以丹江库区的XSX及取水口TC01处较高, 主要由软体动物贡献; 而汉江库区相对较高的生物量主要是由于底栖动物的高密度所致. 五青入库区无论密度还是生物量均较低; CJD作为五龙池和青塘河两条河流入库混合后的交汇区, 密度及生物量相对其余2点较高. 从物种组成角度讲, 丹江口水库底栖动物以颤蚓科占绝对优势; 取水口TC01处较为特殊, 摇蚊科与颤蚓科优势度相当.

### 2.3 底栖动物季节变化

各样点底栖动物密度最高值出现在夏季的坝前区域(DB), 为33792 ind./m<sup>2</sup>, 优势种为颤蚓科的正颤蚓(*T. tubifex*)和霍甫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*), 分别占该点底栖动物总密度的72.4%和26.9%; 最低值亦出现在夏季, 为青塘河入库区的XDP, 密度为0(图3). 生物量的最高值出现在夏季丹江库区的小三峡(XSX)处, 主要是由软体动物门的无齿蚌属(*Anodonta* sp.)贡献.

表1 丹江口水库底栖动物名录  
Tab. 1 Taxon found in Danjiangkou Reservoir

线形动物门 Nematoda	Tubificidae spp.	<i>Bethilbeckia</i> sp.
线形动物 Nematoda spp.	肥满仙女虫 <i>Nais inflata</i>	<i>Cryptotendipes</i> sp.
扁形动物门 Platyhelminthes	参差仙女虫 <i>N. variabilis</i>	<i>Paralauterborn</i> sp.
三角涡虫一种 <i>Dugesia</i> sp.	仙女虫科一种 Naididae sp. 1	菱跗摇蚊一种 <i>Clinotanypus</i> sp.
环节动物门 Annelida	费氏拟仙女虫 <i>Paranais frici</i>	<i>Pseudochironomus</i> sp.
霍甫水似蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	<i>Pristinella longisoma</i>	<i>Coelotanypus</i> sp.
巨毛水丝蚓 <i>L. grandisetosus</i>	小吻盲虫一种 <i>Pristinella</i> sp.	Chironomidae sp. 1
水丝蚓一种 <i>Limnodrilus</i> sp. 1	节肢动物门 Arthropoda	Chironomidae sp. 2
厚唇嫩丝蚓 <i>Teneritrilus mastix</i>	小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.	直突摇蚊一种 Orthoclaudiinae spp.
苏氏尾腮蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.	长足摇蚊一种 Tanypodinae spp.
唯窠夫盘丝蚓 <i>Brothrioneurum vejdoskyanum</i>	<i>Polypedilum halterale</i> gr.	螳科一种 <i>Probezzia</i> spp.
多毛管水蚓 <i>Aulodrilus plurisetia</i>	<i>P. flavum</i>	虻属一种 <i>Tabanus</i> sp.
皮氏管水蚓 <i>A. pigueti</i>	<i>P. tritum</i>	蜉蝣属一种 <i>Ephemera</i> sp.
管水蚓一种 <i>A.</i> sp. 1	<i>P. laetum</i>	五洲蜉 <i>Ephemera wuchonzensis</i>
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	<i>P. trigonus</i>	软体动物门 Mollusca
<i>T. ignotus</i>	<i>P. aviceps</i>	刻纹蚬 <i>Corbicula largillier</i>
<i>Tasserlodrilus kessleri</i>	<i>P.</i> sp. 1	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>
<i>Ilyodrilus templetoni</i>	<i>Stictochironomus</i> sp.	蚬属一种 <i>Corbicula</i> sp.
<i>Rhyacodrilus brevidentatus</i>	羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	无齿蚌属一种 <i>Anodonta</i> sp.
<i>Potaphrix vejdoskyi</i>	<i>Chironomus stigmaterrus</i>	射线裂脊蚌 <i>Schistodesmus lampreyanus</i>
Tubificidae sp. 1	摇蚊属一种 <i>Chironomus</i> sp.	沼螺属一种 <i>Parafossarulus</i> sp.
Tubificidae sp. 2	隐摇蚊一种 <i>Cryptochironomus</i> sp.	梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>

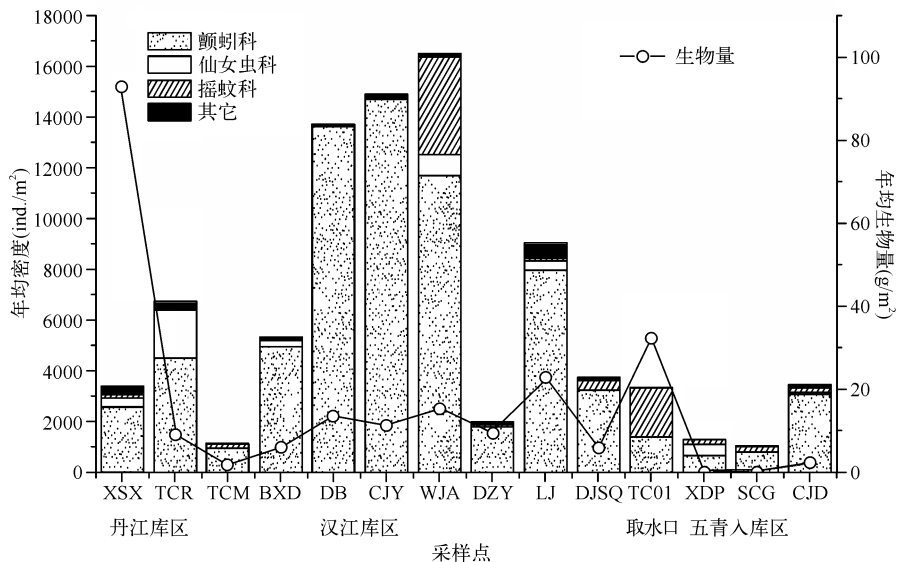


图2 底栖动物年均密度及生物量分布

Fig. 2 Distributions of the macroinvertebrate density and biomass

总体上讲,丹江口水库底栖动物密度以夏季最高,春季次之,再次是秋季和冬季;生物量也是以夏季和春季较高,而秋季与冬季差别较小(图4).

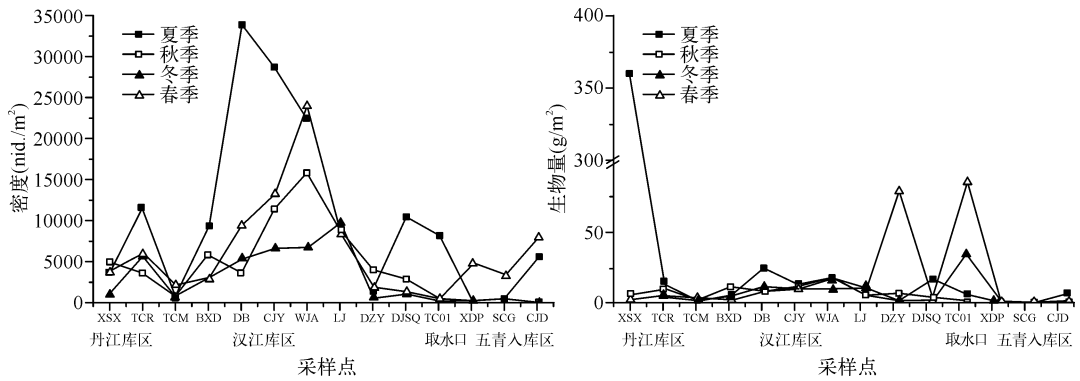


图3 各样点底栖动物密度和生物量季节动态

Fig.3 Seasonal dynamics of the macroinvertebrate's density and biomass

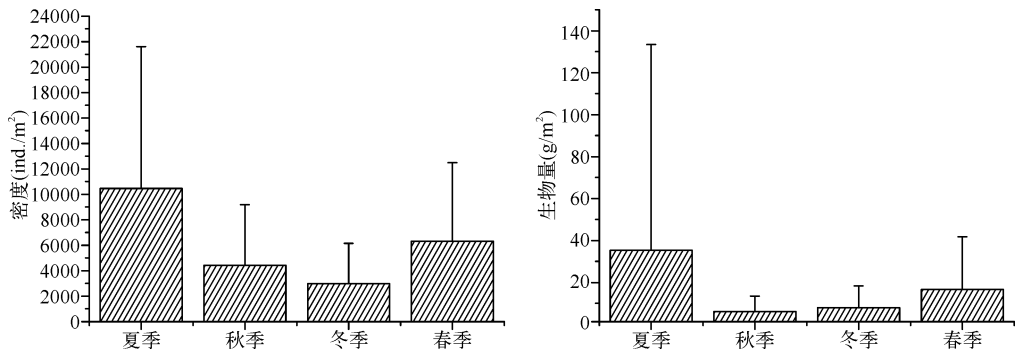


图4 丹江口水库底栖动物密度和生物量平均值的季节变化

Fig.4 Seasonal changes of the mean values of the macroinvertebrate's density and biomass in Danjiangkou Reservoir

从不同季节各类别底栖动物密度及生物量的百分比(表2)可以看出,寡毛类全年都是密度优势类群,占底栖动物总密度的90%以上;但其在生物量中所占的比例则不然.秋季寡毛类占总生物量的96.5%,这种优势地位主要是由于软体动物的缺少所造成,但同时也会导致秋季整体生物量水平较低.冬季寡毛类生物量百分比也在50%以上,而夏季和春季仅占20%左右,这主要是软体动物的出现降低了寡毛类的生物量比重.

2.4 生物指数

Shannon-Wiener 多样性指数所规定的水质标准为: $H' > 2$  为清洁;1 - 2 为轻污染;0 - 1 为重污染<sup>[13]</sup>. 依据此标准对丹江口水库各采样点水质进行评价. 从年平均水平上讲,库区大部分区域处于轻污染状态;少量的重污染样点出现在汉江库区及五青入库区. 夏秋季节呈现重污染状态的样点增加,尤以汉江库区较重(表3).

表2 各类别密度及生物量百分比的季节变化

Tab.2 Seasonal changes of the density and biomass percentage of different taxa

季节	类别	密度百分比(%)	生物量百分比(%)
夏季	寡毛纲	91.30	23.0
	摇蚊科	7.08	1.13
	其它	1.66	75.90
秋季	寡毛纲	88.4	96.50
	摇蚊科	2.31	1.60
	其它	9.28	1.92
冬季	寡毛纲	93.50	58.90
	摇蚊科	4.43	0.66
	其它	2.03	40.50
春季	寡毛纲	96.90	27.30
	摇蚊科	1.48	0.35
	其它	1.67	72.4

表3 利用 Shannon-Wiener 生物多样性指数进行评价的结果

Tab.3 Results of the water quality assessment according to Shannon-Wiener diversity index

采样点			夏季	秋季	冬季	春季	平均
丹江库区	XSX	$H'$	2.20	1.62	1.22	2.51	1.89
		污染程度	清洁	轻污染	轻污染	清洁	轻污染
	TCR	$H'$	1.39	1.38	1.59	1.48	1.46
		污染程度	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
	TCM	$H'$	2.33	0.69	1.19	1.64	1.46
		污染程度	清洁	重污染	轻污染	轻污染	轻污染
BXD	$H'$	1.17	1.06	0.98	1.58	1.20	
	污染程度	轻污染	轻污染	重污染	轻污染	轻污染	
汉江库区	DB	$H'$	0.90	1.28	1.02	1.11	1.08
		污染程度	重污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
	CJY	$H'$	0.76	0.95	0.55	1.29	0.89
		污染程度	重污染	重污染	重污染	轻污染	重污染
	WJA	$H'$	1.08	1.84	1.24	1.62	1.45
		污染程度	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染
	LJ	$H'$	-	1.50	0.58	1.60	1.23
		污染程度	-	轻污染	重污染	轻污染	轻污染
	DZY	$H'$	0.71	1.89	2.27	2.18	1.76
		污染程度	重污染	轻污染	清洁	清洁	轻污染
DJSQ	$H'$	0.66	2.75	2.12	1.88	1.85	
	污染程度	重污染	清洁	清洁	轻污染	轻污染	
取水口	TC01	$H'$	0.52	0.53	2.72	2.48	1.56
		污染程度	重污染	重污染	清洁	清洁	轻污染
五青入库区	XDP	$H'$	0.00	0.00	1.79	2.08	0.97
		污染程度	重污染	重污染	轻污染	清洁	重污染
	SCG	$H'$	1.08	0.00	1.61	2.02	1.18
		污染程度	轻污染	重污染	轻污染	清洁	轻污染
	CJD	$H'$	1.68	1.92	1.50	1.36	1.62
		污染程度	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染	轻污染

Goodnight-Whitley 生物指数评价标准为<sup>[14]</sup>: 0-30(清洁), 30-60(轻污染), 60-80(中污染), >80(重污染). 利用 Goodnight-Whitley 生物指数对丹江口水库水质进行评价(表4), 结果表明该指数评价所得的各区污染程度大部分呈现重污染状态; 仅有取水口的 TC01 和五青入库区的 XDP 表现为清洁状态, 以及汉江库区的 DJSQ 和五青入库区的 SCG 表现为轻污染状态.

Wright 生物指数也是一种较为常用的底栖动物评价水环境的方法, 其评价标准<sup>[15]</sup>为: <100(清洁)、100-999(轻污染)、1000-5000(中污染)、>5000(重污染). 从年平均水平上讲, 丹江库区水质呈中污染状态, 汉江库区呈重污染状态, 取水口为轻污染, 五青入库区为轻-中污染; 并且, 该指数所评价的汉江库区大部分样点一年四季均呈现重污染状态(表5).

除以上生物指数外, 还有一种 Carlander 生物量评价标准较为常用<sup>[16]</sup>, 其规定: 底栖动物生物量 0.2-1.7g/m<sup>2</sup> 为贫营养型, 2.5-6.25g/m<sup>2</sup> 为中营养型, 10-25g/m<sup>2</sup> 为富营养型. 丹江口水库各库区 4 个季节的生物量分布见表 6. 但是, 由于许多样点软体动物的存在使得生物量激增, 因此, 表 6 中还列出了不包含软体动

表4 利用 Goodnight-Whitley 生物指数进行评价的结果  
Tab.4 Results of the assessment according to Goodnight-Whitley index

采样点			夏季	秋季	冬季	春季	平均
丹江库区	XSX	$I_{GW}$	67.2	90.9	94.7	92.9	86.4
		污染程度	中污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	TCR	$I_{GW}$	95.7	86.8	96.4	97.5	94.1
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	TCM	$I_{GW}$	12.2	96.5	88.7	98.8	74.1
		污染程度	清洁	重污染	重污染	重污染	中污染
BXD	$I_{GW}$	98.1	98.9	100	95.9	98.2	
	污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染	
汉江库区	DB	$I_{GW}$	99.3	97.8	99.3	99.4	99.0
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	CJY	$I_{GW}$	99.5	96.6	96.6	98.2	97.8
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	WJA	$I_{GW}$	98.4	83.8	91.8	96.6	92.7
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	LJ	$I_{GW}$	-	83.3	96.9	96.0	92.1
		污染程度	-	重污染	重污染	重污染	重污染
	DZY	$I_{GW}$	89.3	95.3	85.1	85.2	88.7
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	DJSQ	$I_{GW}$	98.6	46.5	13.7	90.8	62.4
		污染程度	重污染	轻污染	清洁	重污染	轻污染
取水口	TC01	$I_{GW}$	2.40	0	50	68.8	30.3
		污染程度	清洁	清洁	轻污染	中污染	清洁
五青入库区	XDP	$I_{GW}$	0	0	28.6	88	29.2
		污染程度	清洁	清洁	清洁	重污染	清洁
	SCG	$I_{GW}$	85.0	0	11.5	85.6	45.5
		污染程度	重污染	清洁	清洁	重污染	轻污染
	CJD	$I_{GW}$	93.0	66.7	25	90.5	61.6
		污染程度	重污染	中污染	清洁	重污染	重污染

物在内时采用生物量法评价的结果. 可以明显看出, 软体动物是否包含在内对评价结果有较大影响. 包含软体动物生物量时, 除五青入库区因底栖动物密度较低从而导致生物量也较低因此显示的营养状态较低之外, 其余样点除秋季取水口处成贫营养状态, 库区各季节都在中-富营养或富营养状态; 甚至许多库区的生物量水平已远远超过富营养状态的范围. 而不包含软体动物在内的生物量评价结果表明, 丹江库区水体总体上处于中营养状态, 汉江库区处于中-富营养状态, 陶岔取水口在多数季节都呈贫营养状态, 而五青入库区营养水平也较低, 可定为贫营养状态.

### 3 讨论

#### 3.1 底栖动物分布

寡毛类喜好粒径较小、有机质丰富的底质<sup>[17-18]</sup>, 有机质含量的增加会引起寡毛类特别是颤蚓科密度和生物量水平的升高<sup>[19]</sup>. 尤其是正颤蚓 (*T. tubifex*) 和霍甫水丝蚓 (*L. hoffmeisteri*), 因其主要以有机质为食从

表 5 利用 Wright 生物指数进行评价的结果  
Tab. 5 Results of the assessment according to Wright index

采样点		夏季	秋季	冬季	春季	平均	
丹江库区	XSX	Wright 指数	2448	4480	947	2093	2492
		污染程度	中污染	中污染	轻污染	中污染	中污染
	TCR	Wright 指数	3616	3147	5320	5693	4444
		污染程度	中污染	中污染	重污染	重污染	中污染
	TCM	Wright 指数	80	1085	613	2173	988
		污染程度	清洁	中污染	轻污染	中污染	轻污染
BXD	Wright 指数	9168	5733	4480	1707	5272	
	污染程度	重污染	重污染	中污染	中污染	重污染	
汉江库区	DB	Wright 指数	33568	3480	5320	9213	12895
		污染程度	重污染	中污染	重污染	重污染	重污染
	CJY	Wright 指数	28488	11027	12787	12787	16272
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	WJA	Wright 指数	22000	13253	5907	20000	15290
		污染程度	重污染	重污染	重污染	重污染	重污染
	LJ	Wright 指数	-	7280	9453	7067	7933
		污染程度	-	重污染	重污染	重污染	重污染
	DZY	Wright 指数	1200	3747	533	1533	1753
		污染程度	中污染	中污染	轻污染	中污染	中污染
	DJSQ	Wright 指数	10208	1320	120	1187	3209
		污染程度	重污染	中污染	轻污染	中污染	中污染
取水口	TC01	Wright 指数	192	0	173	293	165
		污染程度	轻污染	清洁	轻污染	轻污染	轻污染
五青入库区	XDP	Wright 指数	0	0	64	2416	620
		污染程度	清洁	清洁	清洁	中污染	轻污染
	SCG	Wright 指数	272	0	48	1952	568
		污染程度	轻污染	清洁	清洁	中污染	轻污染
	CJD	Wright 指数	4864	64	16	1008	1488
		污染程度	中污染	清洁	清洁	中污染	中污染

表 6 依据生物量进行的各区营养状态评价  
Tab. 6 The eutrophic state assessment according to the biomass

	包含软体动物				不包含软体动物			
	丹江库区	汉江库区	取水口	五青入库区	丹江库区	汉江库区	取水口	五青入库区
夏季	95.3	14.6	6.36	2.32	7.25	14.6	3.83	2.32
	富营养	富营养	中-富营养	中营养	中-富营养	富营养	中营养	贫-中营养
秋季	7.14	8.88	0.48	0.05	7.14	8.71	0.05	0.48
	中-富营养	中-富营养	贫营养	贫-中营养	中-富营养	中-富营养	贫营养	贫营养
冬季	3.08	7.57	34.94	8.76	3.08	7.57	0.24	0.04
	中营养	中-富营养	富营养	中-富营养	中营养	中-富营养	贫营养	贫营养
春季	3.32	21.4	86.5	0.78	3.32	8.21	0.06	0.79
	中营养	富营养	富营养	贫营养	中营养	中-富营养	贫营养	贫营养



而更易受到影响<sup>[20-21]</sup>。丹江口水库底栖动物以寡毛类为主,说明水库沉积物属粒径较小的淤泥类底质且有机质含量较为丰富;而汉江库区底栖动物密度明显高于丹江库区也说明汉江库区底质的有机污染相对较重。当然,这都有待于进一步的沉积物的数据证明。此外,五青入库区经常出现密度为0的样品;2007年夏季XDP密度为0;2007年秋季SCG密度为0,XDP密度也仅为16ind./m<sup>2</sup>。此二点分别位于青塘河和五龙池的入库区,夏秋季节上游较大的来水量携带大量泥沙入库,泥沙的掩埋可能是导致该处底栖动物密度较低的主要原因<sup>[22]</sup>。尤其是XDP处于水土流失较为严重的青塘河小流域入库区,更易受到入库泥沙的影响。

“南水北调”中线工程水源地陶岔取水口(TC01)颤蚓科相对较低的优势度表明此处水质依旧良好;而取水口所在的丹江库区亦拥有相对较低的颤蚓科密度和相对较高的生物多样性指数,亦可说明整个丹江库区水质相对汉江库区较为清洁。

### 3.2 水质生物学评价

本研究中,Shannon-Wiener生物多样性指数评价结果表明丹江口水库在年均水平上呈轻度污染状态;但在夏秋季节,大部分样点生物多样性指数降低,因此评价结果显示水体呈重污染状态,尤以汉江库区和五青入库区较重。实际上,夏秋季节是丹江口水库的汛期,上游较高的来水量对部分底栖动物如仙女虫科<sup>[23-24]</sup>的生境造成影响,从而导致密度及生物多样性指数降低。邵美玲等<sup>[25]</sup>对三峡水库底栖动物季节动态的研究也有同样的结果。因此,笔者认为,此种条件下Shannon-Wiener生物多样性指数的降低并不能代表水质的突然恶化,因而推测丹江口水库夏秋季节的水质并不适宜单独采用Shannon-Wiener多样性指数进行评价。

依据Goodnight-Whitley生物指数对水质评价得出的结果为:大部分样点呈现重污染状态。该指数系指寡毛类在底栖动物总密度中所占的比例,而丹江口水库底栖动物的优势类群即为寡毛类,因此,该生物指数不宜作为丹江口水库水质生物学评价的标准。池仕运等<sup>[26]</sup>对湖北三道河水库底栖动物的研究亦表明Goodnight-Whitley生物指数不适于该水库的水质评价。据此推测,水库特别是深水水库生态系统,由于通常都以寡毛类为优势类群,因此不适合采用Goodnight-Whitley生物指数作为水质评价标准。

Wright生物指数与Carlander生物量法的评价结果较为相近,且与先前丹江口水库水质的评价结果十分接近<sup>[7,10]</sup>,因此,可将这两种方法与Shannon-Wiener多样性指数结合对丹江口水库水质进行综合评价。

由于各生物指数所划分的水质等级不同,因而得出的评价结果也存在一定的差异。本文中采用Wright生物指数和Carlander生物量法所采用的4个等级的标准:清洁-轻污染-中污染-重污染,但为模糊评价,即非定量评价。综合各生物指数可以得出各库区污染梯度为:取水口(轻污染) < 丹江库区(轻-中污染) < 汉江库区(中-重污染),且从库区各样点的污染状态来看,较靠近大坝的点,污染状态相对较重。主要原因可能是靠近大坝的区域水流变缓,水力滞留时间延长,从而导致各种污染物容易在此聚集<sup>[27]</sup>。各指数对五青入库区的评价差别较大;Shannon-Wiener多样性指数表明该区呈现轻-中度污染,Wright生物指数评价该区为中度污染,而生物量评价法则评价为贫营养状态。因此笔者推测,由于该区是河流与水库的交汇区,水深较浅、水土流失较重,底栖动物的生境易受到外界干扰从而导致群落结构易发生较大幅度的波动,因此,该区不宜采用底栖动物作为水质评价的指标;频繁的水体理化指标的监测可能是该区水质评价的最好方法。

## 4 参考文献

- [1] Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [2] Devine JA, Vanni MJ. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2002, 47: 1107-1121.
- [3] Callito M, Goulart M, Narnosa FAR *et al.* Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco river (northeastern Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, 2005, 65: 229-240.
- [4] Berezina NA. Water quality estimation in the Kotorosl' River Basin based on zoobenthos composition. *Water Resources*, 2000, 27(6): 654-662.
- [5] Moreno P, Callisto M. Benthic macroinvertebrates in the watershed of an urban reservoir in southeastern Brazil. *Hydrobiologia*, 2006, 560: 311-321.
- [6] 波鲁茨基 EB, 伍献文, 白国栋等. 丹江口水库库区水生生物调查和渔业利用的意见. *水生生物学集刊*, 1959, (1):

33-56.

- [ 7 ] 韩德举, 彭建华, 简 东等. 丹江口水库的饵料生物资源及水体营养状态评价. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 57-62.
- [ 8 ] 邬红娟, 彭建华, 韩德举等. 丹江口水库浮游植物及其演变. 湖泊科学, 1996, **8**(1): 43-50.
- [ 9 ] 刘明宽, 徐元顺, 朱理国等. 丹江口水库流域致洪过程的水文气候特征分析. 湖北气象, 2001, (4): 15-16.
- [ 10 ] 成庆利, 朱铁群. 丹江口水库库区水环境质量评价. 水土保持研究, 2008, **15**(1): 202-204.
- [ 11 ] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999: 27-105.
- [ 12 ] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范——中国生态系统研究网络(CERN)长期观测规范丛书. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 29-110.
- [ 13 ] Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, **27**: 379-423, 623-656.
- [ 14 ] Goodnight CJ, Whitley LS. Oligochaetes as indicators of pollution. Proceeding of 15th Annual Water Conference. Indiana: Purdue University, Lafayette, 1960, 160: 139-142.
- [ 15 ] Wright S. Limnological survey of western Lake Erie. U. S. Fish and Wildlife Service, Special Scientific Report; Fisheries No. 139, 1955.
- [ 16 ] Carlander KD. Farm fish pond research in Iowa. *Journal of Wildlife Management*, 1952, **16**(3): 258-261.
- [ 17 ] Tevesz MJS, Soster FM, McCall PL. The effects of size-selective feeding by oligochaetes on the physical properties of river sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1980, **50**: 561-568.
- [ 18 ] Matisoff G, Wang XS, McCall PL. Biological redistribution of lake sediments by tubificid oligochaetes: *Branchiura sowerbyi* and *Limnodrilus hoffmeisteri*/Tubifex tubifex. *Journal of Great Lakes Research*, 1999, **25**: 205-219.
- [ 19 ] Perla L, Escobar E, Alcocer J *et al.* Oligochaetes from six trophic crater lakes in Central Mexico: species composition, density and biomass. *Hydrobiologia*, 2002, **467**: 109-116.
- [ 20 ] Brinkhurst RO, Chua KE, Kaushik NK. Interspecific interactions and selective feeding by tubificid oligochaetes. *Limnology & Oceanography*, 1972, **17**: 122-133.
- [ 21 ] Rodriguez P, Martinez-Madrid M, Arrate JA *et al.* Selective feeding by the aquatic oligochaete Tubifex tubifex (Tubificidae, Clitellata). *Hydrobiologia*, 2001, **463**: 133-140.
- [ 22 ] Kaller MD, Hartman KJ. Evidence of a threshold level of fine sediment accumulation for altering benthic macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia*, 2004, **518**: 95-104.
- [ 23 ] Ratsak CH, Kooijman SALM, Kooi BW. Modelling the growth of an Oligochaete on activated sludge. *Water Research*, 1993, **27**: 739-747.
- [ 24 ] Lölein B. Seasonal dynamics of aufwuchs Naididae (Oligochaeta) on *Phragmites australis* in a eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 1996, **334**: 115-123.
- [ 25 ] Shao ML, Xie ZC, Han XC *et al.* Macroinvertebrate community structure in Three-Gorges Reservoir, China. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93**(2): 175-187.
- [ 26 ] 池仕运, 彭建华, 万成炎等. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 705-712.
- [ 27 ] Jones JR, Knowlton MF. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment feature and internal process. *Water Research*, 2005, **39**: 3629-3635.